

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ
УСТАНОВКИ «ЛУЧ» С АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ НЕОДИМОВОГО
ФОСФАТНОГО СТЕКЛА КНФС И ОТРАЖАТЕЛЯМИ ИЗ ФОЛЬГИ MIRO SILVER
RESEARCH OF ENERGY CHARACTERISTICS OF POWER AMPLIFIER CONTAINING
KNFS ND:PHOSPHATE GLASS SLABS AND MIRO SILVER FOIL REFLECTORS
AT THE «LUCH» FACILITY**

*И. А. Белов, С. А. Бельков, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин, В. Н. Деркач, С. В. Кошечкин,
М. И. Лысов, С. С. Марков, С. В. Савкин
I. A. Belov, S. A. Bel'kov, I. N. Voronich, S. G. Garanin, V. N. Derkach, S. V. Koshechkin,
M. I. Lysov, S. S. Markov, S. V. Savkin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия, ИЛФИ
RFNC-VNIEF, ILFI

На установке «Луч» проведена модернизация элементов усилителей.

Выполнены измерения коэффициента усиления активной среды усилителя с девятью активными элементами. Получено увеличение коэффициента усиления слабого сигнала K_0 усилителя в диапазоне напряжений конденсаторной батареи (18–24) кВ от $\approx 13\%$ до 14% , увеличение линейного коэффициента усиления g_0 – от 6% до 8% . Максимальное значение g_0 (для $U_{\text{зар}} = 24$ кВ) составило $0,053 \text{ см}^{-1}$.

После замены элементов усилителей на установке «Луч» проведены полномасштабные эксперименты. Получен рост коэффициента усиления силового усилителя, согласующийся с результатами измерений коэффициента усиления активной среды. Проведен анализ изменения коэффициента усиления силового усилителя установки.

The amplifier elements upgrade at the «Luch» laser facility was carried out. Measurements of the gain coefficient showed that the amplifier elements upgrade resulted in amplifier small signal gain coefficient K_0 increase from $\approx 13\%$ to 14% depending on the capacitor charging voltage; the linear gain coefficient increase was about $g_0 \approx (6-8)\%$. Full-scale laser experiments at the facility showed the power amplifier gain coefficient increase consistent with active medium gain coefficient measurement results.

1. Введение

В 2013 году на установке «Луч» [1–2] были проведены работы по модернизации усилителей, которые включали в себя замену защитных стекол усилителей из материала ФЛОАТ на стекла марки К-8 с просветляющим покрытием, замену плоских отражателей из фольги MIRO на отражатели, выполненные из фольги MIRO Silver [3]. Измерения коэффициента усиления [4], выполненные по окончании данных работ, показали, что модернизация элементов усилителя позволила заметно повысить величину запасенной энергии активной среды усилителей: увеличение линейного коэффициента усиления составило от $6,4\%$ до $7,0\%$ [4]. В результате достигнутого роста запасенной энергии, в полномасштабных экспериментах на уста-

новке «Луч» удалось реализовать получение прежнего уровня коэффициента усиления силового усилителя при сниженном факторе загрузки ламп накачки $f_x = 0,2$ (зарядное напряжение на накопителе $U_{\text{зар}} = 20$ кВ) вместо $0,25$ ($U_{\text{зар}} = 22$ кВ) [4].

В продолжение работы [4], в 2015 году на установке «Луч» в ходе плановой переборки усилителей проведено дооснащение канала 1 (нижнего) усилителей У1 и У2 активными элементами из стекла марки КНФС (КНФС-1 и КНФС-3). Канал 2 (верхний) обоих усилителей был переоснащен активными элементами из стекла КГСС-0180/35 из числа использовавшихся ранее. Всего в канале 1 и канале 2 усилителей были установлены 8 шт. активных элементов из стекла КНФС-1, 8 шт. – из стекла КНФС-3, и 20 шт. – из стекла КГСС-0180/35. При установке активных

элементов в усилители руководствовались следующими принципами. Во-первых, в канал 1 устанавливались активные элементы из нового стекла КНФС-1 и КНФС-3. Во-вторых, среди слэбов, отобранных для каналов 1 и 2, элементы с лучшими оптическими характеристиками устанавливались в усилитель У1, где плотность энергии лазерного излучения максимальна; остальные – в усилитель У2.

В результате перекомпоновки активных элементов, активная среда в канале 1 усилителя У1 была сформирована из активных элементов из стекла марки КНФС, преимущественно КНФС-3 (7 шт. – КНФС-3 и 2 шт. – КНФС-1). Активную среду в канале 1 усилителя У2 составили 6 активных элементов из стекла КНФС-1, один – из стекла КНФС-3 и два из стекла КГСС-0180/35. В канале 2 усилителей У1 и У2 были установлены активные элементы, выполненные из стекла марки КГСС-0180/35.

Помимо дооснащения усилителей установки активными элементами из стекла марки КНФС, в ходе переборки усилителей проведена полная замена ромбических отражателей ламповых каскадов, выполненных из фольги MIRO, на ромбические отражатели из фольги MIRO Silver [3].

После перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей, проведены экспериментальные исследования коэффициента усиления активной среды усилителей установки, результатам которых посвящена данная работа.

2. Постановка экспериментов по измерению коэффициента усиления

Измерения коэффициента усиления проводились при усилении излучения штатного юстировочного лазера в канале 1 (нижнем) и канале 2 (верхнем) усилителя У1, в канале 1 усилителя У2 установки «Луч». При измерении использовались девять активных элементов. Схема проведения экспериментов в усилителях У1 и У2 аналогична использованной ранее и описанной в работах [2, 4–6]. Принципиальная схема измерения коэффициента усиления в усилителе У1 представлена на рис. 1.

Излучение штатного юстировочного лазера с длиной волны $\lambda = 1053$ нм и размером пучка $\approx 205 \times 205$ мм² заводилось в усилитель. На выходе усилителя в оптическом тракте устанавливалась диафрагма (3) диаметром $\varnothing = 15$ мм, выделявшая область зондирования на апертуре усилителя.

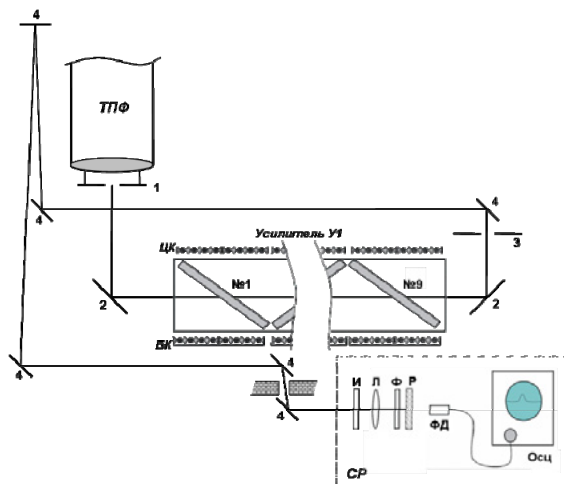


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1: (1 – апертурная диафрагма, 2 – штатные поворотные зеркала, 3 – зондирующая диафрагма, 4 – диэлектрические зеркала, БК и ЦК – боковая и центральная ламповые касетты, СР – схема регистрации, И – интерференционный фильтр, Л – линза, Ф – светофильтр, Р – диффузный рассеиватель, ФД – фотодиод ФД256, Осц – осциллограф TDS-3052В)

Она также ограничивала попадание излучения накачки в схему регистрации и выполняла роль селективирующей диафрагмы. Пройдя через диафрагму (3), пучок диаметром $\varnothing = 15$ мм и мощностью $P \approx 1$ мВт (что соответствовало сигналу на осциллографе $U \approx 20$ мВ) при помощи диэлектрических зеркал (4) доводился до схемы регистрации (СР), находившейся в отдельной от зала установки комнате (в пультовой СФОИ). На входе усилителя, соосно с диафрагмой (3), располагалась апертурная диафрагма (1) диаметром $\varnothing = 20$ мм. В схеме регистрации, излучение при помощи линзы (Л) фокусировалось на фотодиод (ФД). Перед линзой располагался интерференционный фильтр (И) ($\lambda = 1,053$ мкм, $\Delta\lambda_{0,5} = 0,05$ мкм), который обеспечивал отсечение паразитного излучения. Светофильтр ИКС-7 (Ф) ослаблял рабочее излучение до необходимого уровня. Перед фотодиодом устанавливался диффузный рассеиватель (Р) из матированного стекла. Элементы схемы регистрации были закрыты от внешней засветки непрозрачным тубусом. Регистрация осуществлялась по схеме с временным разрешением ~ 30 нс на базе кремниевого фотодиода ФД256 и осциллографа TDS-3052В.

Измерения коэффициента усиления проводились в зависимости от величины накачки при зарядных напряжениях на накопителе 18, 20, 22 и 24 кВ в центральной точке апертуры в каналах 1

и 2 усилителя У1, в канале 1 усилителя У2. За центральную точку апертуры усилителя был принят центр 5-го активного элемента. При проведении измерений на усилителе У1 осуществлялась накачка активных элементов только У1, при измерениях на У2 – только активных элементов усилителя У2.

На рис. 2 представлена характерная осциллограмма формы импульса усиленного излучения юстировочного лазера $U(t)$, зарегистрированного в ходе экспериментов, и осциллограмма «нулевого» сигнала $U_0(t)$, записанная за минуту до опыта при перекрытом излучении юстировочного лазера и в отсутствии накачки.

В процессе обработки, форму импульса усиленного сигнала $U'(t)$ получали, вычитая

$$U'(t) = U(t) - U_0(t). \quad (1)$$

Для получения зависимости коэффициента усиления от времени $K(t)$, в распределении $U'(t)$ выделяли участок до момента начала накачки, по среднему значению которого определяли уровень опорного сигнала $U_{\text{опорн}}$. Временная зависимость коэффициента усиления представлена на рисунке 3 и рассчитана по формуле:

$$K(t) = \frac{U'(t)}{U_{\text{опорн}}} \quad (2)$$

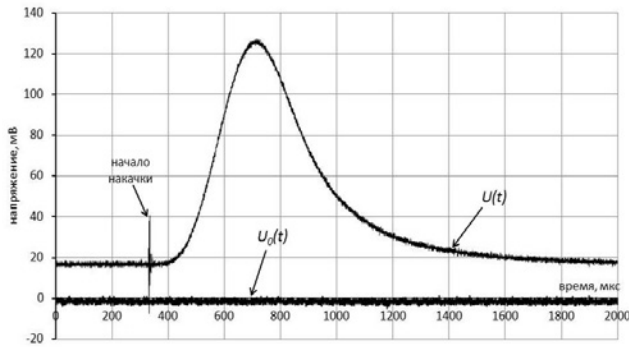


Рис. 2. Характерная осциллограмма временной формы импульса усиленного излучения юстировочного лазера $U(t)$, и «нулевой» сигнал на осциллографе $U_0(t)$

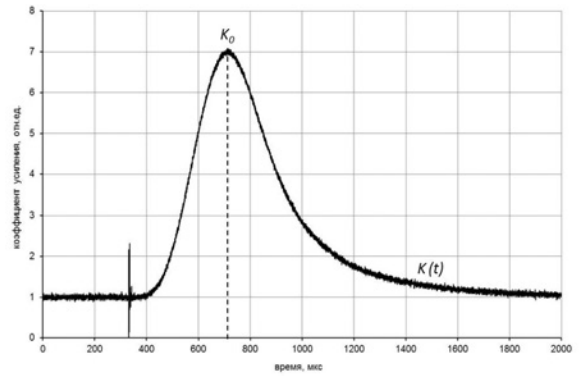


Рис. 3. Распределение коэффициента усиления по времени

Значение коэффициента усиления слабого сигнала K_0 соответствует максимуму распределения $K(t)$, и достигается через ≈ 370 мкс после начала накачки (что примерно соответствует времени прихода моноимпульса в полномасштабных экспериментах). Погрешность определения K_0 составляла $\pm 5\%$. Коэффициент усиления слабого сигнала g_0 вычислялся по формуле:

$$g_0 = \frac{1}{L} \times \ln(K_0), \quad (3)$$

где $L = 43,2$ см – длина активной среды (9 слэбов под углом Брюстера). Относительная погрешность определения линейного коэффициента усиления g_0 оценивалась по формуле:

$$\frac{\Delta g_0}{g_0} = \frac{\Delta K_0}{K_0 \times \ln(K_0)} \approx \pm 2,5\% \quad (4)$$

3. Экспериментальные исследования коэффициента усиления

Проведены измерения коэффициента усиления после переборки усилителей в канале 1 усилителя У1, содержащего активные элементы из стекла КНФС, при зарядных напряжениях на накопители $U_{\text{зар}} = 18, 20, 22$ и 24 кВ.

На рис. 4 приведены полученные в канале 1 усилителя У1 зависимости коэффициента усиления сигнала от времени при зарядных напряжениях на накопителе $U_{\text{зар}} = 18, 20, 22$ и 24 кВ. Для иллюстрации, на рисунке 5 показаны характерный импульс тока накачки, осциллограмма светового импульса накачки, зарегистрированная в одном из опытов в красной области спектра (за фильтром

КС-13), и зависимость коэффициента усиления от времени.

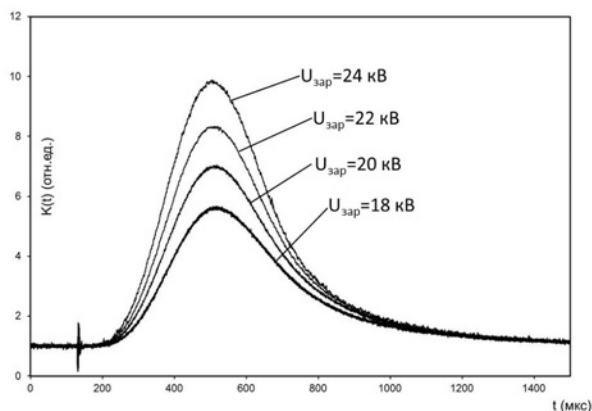


Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления от времени при различных зарядных напряжениях на накопительном теле

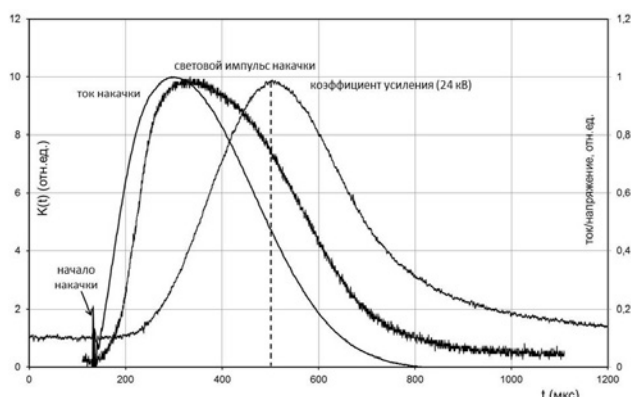


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от времени, осциллограмма светового импульса ($\lambda \geq 600$ нм) и ток накачки

Результаты измерений коэффициента усиления в центральной точке в канале 1 усилителя У1 представлены в табл. 1. В табл. 1 приведены задаваемые зарядные напряжения на накопителе, электрическая энергия, введенная в лампу накачки, измеренные значения коэффициентов усиления слабого сигнала K_0 , и вычисленные по ним значения линейного коэффициента усиления g_0 . Электрическая энергия, введенная в лампу, рассчитывалась как:

$$E_{Д} = \frac{T}{N} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^m C_{ji} \right) \cdot U_i^2}{2} \right], \quad (5)$$

где $N = 144$ – количество ламп накачки в девяти модулях усилителя, $n = 9$ – количество модулей усилителя, $m = 4$ – количество конденсаторов, питающих лампы накачки одного модуля, C – емкость конденсатора, питающего цепочку из четырех последовательно соединенных ламп (паспортное значение), U – зарядное напряжение на батарее в момент пуска ламп, $T \approx 0,8$ [6] – коэффициент передачи электрической энергии от батареи лампам.

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 после дооснащения стеклом КНФС и замены ромбических отражателей

Таблица 1

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 после дооснащения стеклом КНФС и замены ромбических отражателей

$U_{зар}, \text{кВ}$	18	20	22	24
$E_{Д}, \text{кДж}$	5,4	6,6	8,0	9,5
K_0	$5,65 \pm 0,28$	$7,07 \pm 0,35$	$8,30 \pm 0,42$	$9,72 \pm 0,49$
$g_0 \times 10^2, \text{см}^{-1}$	$3,99 \pm 0,10$	$4,52 \pm 0,11$	$4,90 \pm 0,12$	$5,29 \pm 0,13$

На рис. 6 представлены значения коэффициента усиления и зависимости коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 от электрической энергии, введенной в лампу накачки: полученных после переборки усилителей, и полученных в 2013 году после замены защитных стекол [4].

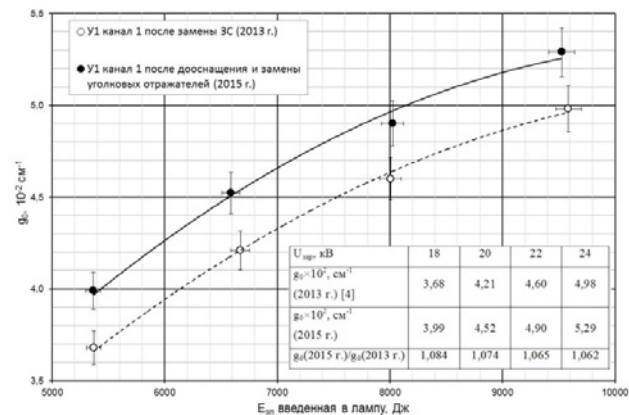


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления в центральной точке апертуры канала 1 усилителя У1 до и после дооснащения усилителей слэбами из стекла КНФС и замены ромбических отражателей

Как видно из рис. 6, в результате дооснащения канала 1 установки активными элементами из стекла КНФС и замены ромбических отражателей в ламповых кассетах, в канале 1 усилителя У1 достигнуто заметное увеличение линейного коэффициента усиления (запасенной энергии). Приращение величины g_0 составило от $\approx 6,2\%$ до $\approx 8,4\%$ в зависимости от энергии, введенной в лампу, $E_{Д}$ от $\approx 5,4$ кДж до $\approx 9,6$ кДж (зарядное напряже-

ние от 18 до 24 кВ). Такое значительное приращение величины коэффициента усиления непонятно, так как технические требования на материал активных элементов марок КГСС-0180/35 и КНФС идентичны, а ожидаемое же увеличение потока излучения накачки при замене ромбических отражателей из фольги MIRO на MIRO Silver не превышает 3 % (коэффициенты отражения фольг 95 % и 98 % [3]).

Поэтому было решено провести более тщательные исследования коэффициента усиления, которые позволили бы напрямую сравнить значения коэффициента усиления, получаемые на активных элементах из стекла КНФС и КГСС-0180/35, исключив влияние материала ромбических отражателей.

3.1 Исследования коэффициента усиления активной среды, основанной на разных типах лазерного стекла

Чтобы исключить влияние материала ромбических отражателей на приращение величины g_0 , проведены измерения коэффициента усиления в канале 2 усилителя У1 с активными элементами из стекла КГСС-0180/35 и измерения¹ в канале 1 усилителя У1, содержащем активные элементы из стекла КНФС.

Известно [4], что значения коэффициентов усиления в каналах 1 и 2 усилителя У1 до замены ромбических отражателей и перекомпоновки активных элементов были близки (совпадали в пределах погрешности измерений и обработки экспериментальных данных). Очевидно, что в обоих каналах усилителя У1 реализуются одинаковые условия накачки.

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 2 усилителя У1 и в канале 1 усилителя У1 при одинаковых условиях накачки приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 2 усилителя У1 после перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей

$U_{\text{зар}}$, кВ	18	20	22	24
$E_{\text{л}}$, кДж	5,4	6,6	8,0	9,5
K_0	$4,99 \pm 0,25$	$6,02 \pm 0,30$	$7,31 \pm 0,37$	$8,44 \pm 0,42$
$g_0 \times 10^2$, см ⁻¹	$3,72 \pm 0,09$	$4,15 \pm 0,10$	$4,61 \pm 0,12$	$4,94 \pm 0,12$

Таблица 3

Результаты измерения коэффициента усиления в канале усилителя со стеклом КНФС после перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей

$U_{\text{зар}}$, кВ	18	20	24
$E_{\text{л}}$, кДж	5,4	6,6	9,5
K_0	$5,59 \pm 0,28$	$6,84 \pm 0,34$	$9,41 \pm 0,47$
$g_0 \times 10^2$, см ⁻¹	$3,98 \pm 0,10$	$4,45 \pm 0,11$	$5,19 \pm 0,13$

На рис. 7 представлены результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 со стеклом КНФС и в канале 2 усилителя У1 со стеклом КГСС-0180/35 в зависимости от электрической энергии, введенной в лампу накачки.

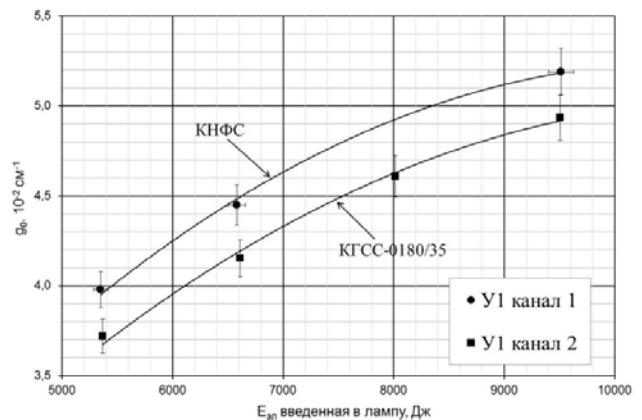


Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления от энергии введенной в лампу в канале 1 У1 на стекле КНФС и канале 2 У1 на стекле КГСС-0180/35

Как видно из рис. 7, значения g_0 , полученные в канале 2 усилителя У1, с активной средой на базе слэбов из стекла КГСС-0180/35, в диапазоне зарядных напряжений от 18 до 24 кВ ($E_{\text{л}}$ от $\approx 5,4$ кДж до $\approx 9,6$ кДж) составили от $\approx 3,7 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ до $\approx 4,9 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹. В канале 1 усилителя У1 с активными элементами из стекла КНФС (преимущественно, КНФС-3), при тех же условиях накачки

¹ Между измерениями коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1, описанными в пункте 3, и измерениями в канале 2 усилителя У1, на установке была проведена серия из 22 облучательных экспериментов. Поэтому, для корректного сравнения результатов, измерения в канале 1 усилителя У1 были выполнены повторно непосредственно после измерений в канале 2 усилителя У1.

значения коэффициента усиления оказались выше и составили от $\approx 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ до $\approx 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Таким образом, величина линейного коэффициента усиления в канале усилителя с активными элементами из стекла КНФС выше, чем в канале с активными элементами из стекла КГСС-0180/35 на $\approx 7\%$.

Представляет интерес величина коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2, содержащим активные элементы из стекла марок как КНФС-1 и КНФС-3, так и КГСС-0180/35.

Проведены измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2, содержащем активные элементы как из стекла КНФС, так и КГСС-0180/35. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 8.

Таблица 4

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2

$U_{\text{зар}}, \text{ кВ}$	18	20	22	24
$E_{\text{л}}, \text{ кДж}$	5,4	6,6	8,0	9,5
K_0	$5,29 \pm 0,26$	$6,49 \pm 0,32$	$7,84 \pm 0,39$	$9,01 \pm 0,45$
$g_0 \times 10^2, \text{ см}^{-1}$	$3,86 \pm 0,10$	$4,33 \pm 0,11$	$4,77 \pm 0,12$	$5,09 \pm 0,13$

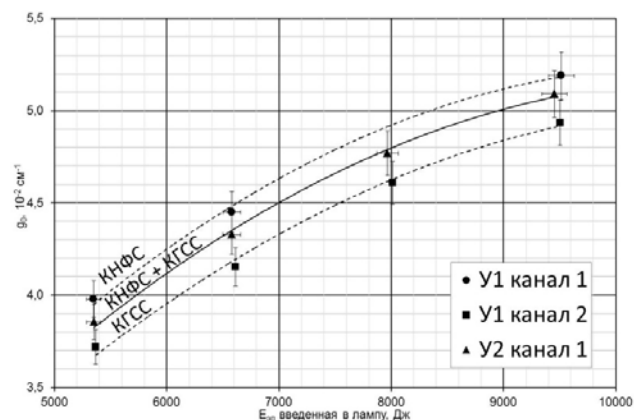


Рис. 8. Зависимость линейного коэффициента усиления от энергии, введенной в лампу накачки, в каналах 1, 2 усилителя У1 и в канале 1 усилителя У2

Зависимость коэффициента усиления от электрической энергии, введенной в лампу накачки, полученная в канале 1 усилителя У2, содержащим активные элементы из стекла марок КНФС и КГСС-0180/35, изображена на графике на рисунке 8 в виде сплошной кривой. Штриховыми кривыми на графике показаны зависимости, полученные в канале 1 усилителя У1 со стеклом КНФС и в канале 2 усилителя У1 со стеклом КГСС-0180/35.

Как видно из рис. 8, величины g_0 , полученные в канале 1 усилителя У2 содержащем слэбы как из стекла КНФС, так и КГСС-0180/35, ожидаемо принимают промежуточные значения между результатами для каналов со стеклом КНФС и со стеклом КГСС.

Рассмотрим, например, значения коэффициента усиления во всех трех вариантах при энергии, введенной в лампу, $E_{\text{л}} \approx 8,3 \text{ кДж}$. Из рис. 8 видно, что при $E_{\text{л}} \approx 8,3 \text{ кДж}$ величина коэффициента усиления на стекле КНФС составляет $\approx 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, на стекле КГСС-0180/35 – $\approx 4,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Тогда величину коэффициента усиления для канала 1 усилителя У2, содержащего 7 слэбов из стекла КНФС и 2 слэба из стекла КГСС-0180/35, можно оценить как:

$$g_0(\text{КНФС} + \text{КГСС}) = \frac{7}{9} \cdot g_0(\text{КНФС}) + \frac{2}{9} \cdot g_0(\text{КГСС}) \approx 4,93 \cdot 10^{-2} (\text{см}^{-1}). \quad (6)$$

Однако, из графика на рисунке 8 видно, что значение g_0 в канале 1 усилителя У2 со смешанной конфигурацией лазерного стекла оказывается меньше и составляет $\approx 4,87 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Отсюда можно предположить, что характерная величина коэффициента усиления для стекол КНФС-1 и КНФС-3 является различной, причем она выше для КНФС-3 (т.к. в канале 1 У1 из девяти слэбов КНФС – 7 шт. КНФС-3, а в канале 1 У2 – из семи слэбов КНФС только 1 шт. КНФС-3). Тогда, для трех представленных на рис. 8 кривых, при $E_{\text{л}} = 8,3 \text{ кДж}$ запишем:

$$\frac{1}{9} \cdot (2 \cdot g_0^{(\text{КНФС-1})} + 7 \cdot g_0^{(\text{КНФС-3})}) = 5, \quad (7)$$

$$\frac{1}{9} \cdot (6 \cdot g_0^{(\text{КНФС-1})} + g_0^{(\text{КНФС-3})} + 2 \cdot g_0^{(\text{КГСС})}) = 4,87, \quad (8)$$

$$\frac{1}{9} \cdot (9 \cdot g_0^{(\text{КГСС})}) = 4,7. \quad (9)$$

Из уравнения (9) получаем, что при $E_{\text{л}} = 8,3 \text{ кДж}$ характерная величина коэффициента усиления для стекла КГСС-0180/35 должна составлять $4,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Из уравнений (7) и (8) следует, что $g_0 \approx 4,895 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ для стекла КНФС-1 и $\approx 5,029 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ для КНФС-3. Таким образом, оцененное значение коэффициента усиления на стек-

ле КНФС-3 при $E_{л} = 8,3$ кДж оказывается на $\approx 2,7$ % выше, чем на КНФС-1.

3.2. Исследования величины коэффициента усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах

Измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1, проведенные непосредственно по окончании переборки усилителей (табл. 1) и повторенные после полномасштабных экспериментов (табл. 3), показали снижение значений g_0 после серии облучательных экспериментов на величину ≤ 2 %, что не превышает погрешности измерений и обработки результатов. Однако, это незначительное снижение величины коэффициента усиления может быть вызвано деградацией поверхности активных элементов под действием излучения накачки в ходе 22 срабатываний ламп в полномасштабных экспериментах.

При штатном зарядном напряжении 20 кВ величина коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 в измерениях, проведенных непосредственно после переборки усилителей составила $g_0 = 4,52 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Отношение величин g_0 в канале 1 усилителей У1 и У2, измеренных после серии облучательных опытов, равно $4,45/4,33 \approx 1,028$ (смотри табл. 3 и 4). Значение коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2 на момент непосредственно после переборки усилителей можно оценить как: $g_0 = 4,52 \cdot 10^{-2} / 1,028 \approx 4,40 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

Величину усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах удобно характеризовать коэффициентом усиления за два прохода K_{12} , равным отношению энергии на входе реверсора к энергии на входе лазерного канала:

$$K_{12} = \frac{E_{\text{рев}}}{E_{\text{вх}}} \quad (10)$$

На первых двух проходах силового усилителя усиление лазерного излучения происходит в линейном режиме, поэтому:

$$K_{12} = K_{y1}^2 \times K_{y2}^2 \times T, \quad (11)$$

где $K_{y1} = \exp(g_0 y_{1l})$ и $K_{y2} = \exp(g_0 y_{2l})$ – коэффициенты усиления слабого сигнала на усилителях У1 и У2, T – пропускание тракта за 2 прохода.

Согласно результатам измерений, выполненных в 2013 году, значение коэффициента усиления до перекомпоновки активных элементов, дооснащения усилителей и замены ромбических отража-

телей в канале 1 усилителя У1 составляло $g_0 \approx 4,21 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ и примерно совпадало с величиной g_0 в канале 1 усилителя У2 [4]. Тогда, согласно (11), коэффициент K_{12} в результате роста значений линейных коэффициентов усиления, достигнутых при замене активных элементов и ромбических отражателей, должен увеличиться в $\approx 1,54$ раза.

На графике на рис. 9 показана зависимость коэффициента усиления силового усилителя K_{12} в канале 1 от номера опыта в полномасштабных экспериментах с зарядным напряжением на накопителе 20 кВ. Белыми кружочками на графике показаны значения K_{12} в опытах до перекомпоновки и дооснащения активными элементами, черными – после установки активных элементов из стекла КНФС и замены ромбических отражателей. Крестиками нанесены значения K_{12} до перекомпоновки, помноженные на коэффициент 1,54.

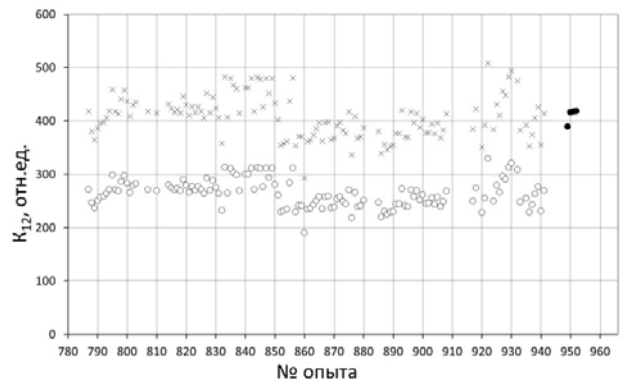


Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления силового усилителя за два прохода от номера опыта в канале 1 установки

Как видно из рис. 9, значения K_{12} до перекомпоновки, увеличенные с учетом полученного роста величины g_0 в 1,54 раза, примерно совпадают с результатами, наблюдаемыми в первых экспериментах после переборки усилителей. Среднее значение K_{12} составляет ≈ 415 . Таким образом, наблюдаемые значения коэффициента усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах согласуются с результатами измерения коэффициента усиления.

3.3. Исследования коэффициента усиления активной среды при разных условиях накачки

Для оценки влияния замены ромбических отражателей на величину коэффициента усиления, проведено сравнение значений g_0 , полученных в канале 2 усилителя У1 до и после замены ромбических отражателей и перекомпоновки активных элементов (в 2013 и 2015 годах). Канал 2 усилителя

У1 как до, так и после перекомпоновки активных элементов, связанной с дооснащением усилителей слэбами из стекла КНФС, включал в себя только активные элементы из стекла КГСС-0180/35.

На рис. 10 представлены зависимости коэффициента усиления от электрической энергии, введенной в лампу накачки, полученные до [4] и после перекомпоновки усилителей и замены ромбических отражателей в канале 2 усилителя У1 (2013 и 2015 годы). Ромбические отражатели в первом случае выполнены из фольги MIRO, во втором – MIRO Silver.

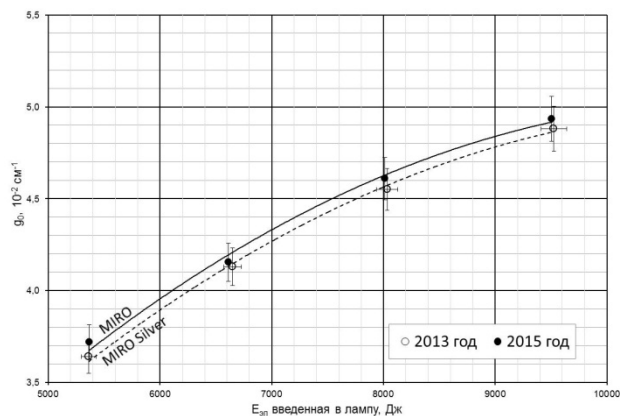


Рис. 10. Зависимость коэффициента усиления от энергии в лампу в канале 2 усилителя У1 до и после перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей

Из графика, представленного на рис. 10, видно, что значения g_0 , полученные после замены ромбических отражателей ламповых кассет, лежат выше, чем полученные со старыми отражателями. Это, вероятно, связано с разной величиной коэффициента отражения используемых фольг. Однако, разница значений g_0 во всем исследованном диапазоне энергии накачки составляет от $\approx 1,1\%$ до $\approx 1,6\%$, что не превышает погрешности измерения и обработки экспериментальных данных.

4. Заключение

Проведена модернизация элементов усилителей, включавшая в себя дооснащение канала 1 установки активными элементами из стекла марки КНФС, перекомпоновку активных элементов в усилителях и замену ромбических отражателей из фольги MIRO на отражатели, выполненные из фольги MIRO Silver.

Выполнены измерения коэффициента усиления активной среды в канале 1 усилителя У1. Получено увеличение коэффициента усиления на величину до $8,4\%$, максимальное значения g_0 при зарядном напряжении на накопителе 24 кВ составило $g_0 \approx 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

Проведены исследования коэффициента усиления в каналах усилителя У1, сформированных на базе стекла КНФС и на базе стекла КГСС-0180/35. Показано, что значения линейного коэффициента усиления активной среды на стекле КНФС выше, чем для стекла КГСС-0180/35 на величину до $\approx 7\%$. Проведены измерения коэффициента усиления в канале усилителя, содержащем активные элементы как из стекла КНФС, так и КГСС-0180/35. Полученные величины коэффициента усиления принимают промежуточные значения между результатами для стекла марки КНФС и марки КГСС-0180/35.

Представлены результаты исследования коэффициента усиления активной среды при разных условиях накачки (с разными ромбическими отражателями). Показано, что замена ромбических отражателей привела к увеличению коэффициента усиления активной среды на величину $\approx 1,5\%$.

Показано, что рост коэффициента усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах согласуется с результатами измерений коэффициента усиления активной среды.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И., и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса $3,3 \text{ кДж}$ и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, №4. С. 299–301.
2. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., и др. Получение высокого коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с элементами из неодимового фосфатного стекла // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, №6. С. 121–122.
3. <http://www.alanod.com>.
4. Белов И. А., Бельков С. А., Воронич И. Н., и др. Исследование влияния модернизации элементов усилительного модуля установки «Луч» на повышение световой эффективности накачки // Сборник тезисов докладов XIII научнотехнической конференции «Молодежь в науке». 2014. С. 59.
5. Белов И. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г., и др. Исследование коэффициента усиления актив-

ной среды усилителя установки «Луч» на неодимовом фосфатном стекле // Сборник докладов 21-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2011». 2011. Т. 2. С. 203–214 // Труды РФЯЦ ВНИИЭФ. 2013. Т. 18. С. 298–305.

6. Воронич И. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г., и др. Измерения коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 6. С. 485–488.